

DOI: 10.7672/sgjs2025240023

基于蒙特卡罗模拟的隧道爆破参数优化方法*

朱 杰

(中铁十八局集团第三工程有限公司,河北 涿州 072750)

[摘要] 近年来隧道工程中已引入计算机控制凿岩台车实施爆破开挖。提出一种基于蒙特卡罗模拟的爆破参数优化方法并针对昂思多隧道爆破施工设计进行了应用,以提升计算机控制台车的应用效能。该方法涵盖钻孔数据解析、爆破方案布设设计,以及应用蒙特卡罗模拟确定最优装药量。结果表明,依据钻孔数据生成的轮廓面可优化炮孔定位、孔网数量及装药量,从而提升爆破作业效率。

[关键词] 隧道;爆破;参数优化;蒙特卡罗方法;数值模拟;施工技术

[中图分类号] U455.6

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)24-0023-05

Optimization Method of Tunnel Blasting Parameters Based on Monte Carlo Simulation

ZHU Jie

(The Third Engineering Co., Ltd. of China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd.,
Zhuzhou, Hebei 072750, China)

Abstract: In recent years, computer-controlled rock drilling rigs are introduced into tunnel engineering to carry out blasting and excavation. In this paper, a blasting parameter optimization method based on Monte Carlo simulation is proposed, and the blasting construction design of Angsiduo Tunnel is applied to improve the application efficiency of the computer-controlled vehicle. The method includes borehole data analysis, blasting scheme layout design, and Monte Carlo simulation to determine the optimal charge. The results show that the contour surface generated according to the drilling data can optimize the positioning of the blast hole, the number of holes and the amount of charge, so as to improve the efficiency of blasting operation.

Keywords: tunnels; blasting; parameter optimization; Monte Carlo method; simulation; construction

0 引言

近年来,各国在公路和铁路等基础设施建设方面持续投入,显著促进了区域间经济增长和文化交流。隧道作为交通系统建设的关键部分,在保障国家战略安全、物资流通、民生保障、区域互联互通等方面发挥着极其重要的作用。当前隧道开挖主要采用爆破法、盾构法及 TBM 法,然而在深埋、层状围岩、软弱夹层、富水带及岩溶发育等复杂地质条件下,机械法掘进面临显著技术瓶颈^[1]。

钻孔爆破法因其施工便捷性、经济性与地质适

应性优势,仍为山岭隧道开挖的主流技术。尽管钻孔爆破法具备上述显著优势,但其能量释放的不可控性易诱发隧道轮廓面超欠挖、围岩破碎区扩展等工程问题^[2]。隧道爆破方案的优化设计是决定工程建设质量的关键因素,对施工效率、成本控制及安全性能具有系统性影响。因此,隧道爆破参数优化一直是隧道施工的技术限制。

对于爆破参数设计理论,邹宝平等^[3]基于灰色理论与 BP 神经网络建立模型对隧道爆破参数优选预测。Yilmaz 等^[4]研究了改进的 Holmberg-Persson 方法在隧道爆破设计中的适用性,并指出该方法可应用于完整的爆破轮次,以选择合适的炸药孔组合。

对于超挖预测和预防,魏继红等^[5]通过结构面网络模拟理论及块体理论基础,结合结构面特征参数值对红枫连拱隧道超挖情况进行预测。

* 中国铁建股份有限公司 2022 年度科技研究开发计划及资助课题 (2022-C1);中铁十八局集团有限公司 2022 年度科研创新项目 (C2022-051)

[作者简介] 朱 杰,工程师,硕士,E-mail: dudule08@163.com

[收稿日期] 2025-08-17

Mohammadnejad 等^[6]采用支持向量回归算法预测爆破作业中的超挖,并观察到良好的应用效果。Saghatforoush 等^[7]开发了一种结合神经网络和蚁群优化的算法,用于预测和优化爆破引起的飞岩和超挖,并使用该算法使得飞岩和超挖可分别减少 61%,58%,同时最大限度地减少飞岩和超挖可能造成的损害。

对于损伤估计和爆破控制,柯庆辉^[8]结合某铁路隧道工程实际,分析了隧道施工爆破作用下周围建筑物的质点振动速度与损伤间关系,系统研究了隧道爆破施工对周围建筑物损伤及其危害控制。Hu 等^[9]通过数值模拟累积爆破损伤研究了平滑爆破和预劈裂爆破开挖方法引起的整个损伤过程,并提出 2 种爆破开挖方法的损伤控制建议。Yan 等^[10]评估了初始应力的瞬态重新分布对损伤区的影响,并将其与爆炸荷载造成的损伤程度进行了对比。

对于爆破的振动速度预测,张在晨等^[11]将比例距离的概念应用于隧道爆破振动分区中,采用 BP 小波神经网络预测爆破近区振速,最终以棋盘山隧道实测数据验证了模型的可行性。Álvarez-Vigil 等^[12]应用 ANNs 来预测爆破传播速度和振动频率。Li 等^[13]提出一种考虑粒子峰值速度来预测地下隧道行为的理论方法。

与传统机器学习和深度学习相比,蒙特卡罗模拟数据需求低,无需大量历史数据。蒙特卡罗模拟适用于完成不确定性分析,而隧道工程最大的挑战就是地质条件的不确定性。

本文以西宁—成都铁路昂思多隧道工程为例,提出了一种基于计算机控制凿岩台车的岩体开挖爆破方案优化方法。该方法运用蒙特卡罗模拟(Monte Carlo simulation, MCS)优化爆破参数(如孔距、最小抵抗线及基于钻孔能耗反演的装药量),以提升设备利用效率。

1 工程概况

昂思多隧道位于青海省海东市境内,是西成铁路 12 标段的重要工程之一。其全长 10.174km,为单洞双线隧道。昂思多隧道标段内Ⅳ级围岩 2 924m,Ⅴ级围岩 540m,共计 3 464m,占比约 34%;Ⅲ级围岩 6 710m,占比 66%。昂思多隧道围岩等级、开挖方法统计如表 1 所示,昂思多隧道围岩物理信息如表 2 所示,选用炸药类型如表 3 所示。

隧道进口及辅助坑道洞口分布危岩落石。隧道洞身大部分位于花岗岩、闪长岩地层中,存在放射性。隧道最大埋深约 655m,属长大深埋高地应力

表 1 昂思多隧道围岩等级、开挖方法

Table 1 Surrounding rock grade and excavation method of Angsiduo Tunnel

隧道名称	隧道类别	围岩级别	开挖方法	长度/m
昂思多隧道	正洞	Ⅲ	台阶法	6 710.00
		Ⅳ	台阶法	2 924.00
		Ⅴ	台阶法+临时仰拱(横撑)法	520.00
		Ⅴ	明挖法(出口明洞)	20.00
昂思多隧道 3 号斜井	永久辅助坑道	Ⅳ	台阶法	752.88
		Ⅴ	短台阶法	342.56

表 2 围岩物理信息

Table 2 Physical information of surrounding rock

围岩名称	围岩级别	密度/(kg·m ⁻³)	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
花岗岩	Ⅰ	2 600~2 700	80~150	20~50
闪长岩				
片麻岩	Ⅱ	2 600~2 800	30~80	10~30
泥灰岩	Ⅲ	2 300~2 500	15~30	5~10
砂岩	Ⅳ	2 200~2 500	15~35	1~5
卵石土	Ⅴ	1 800~2 100	<1	<0.5

表 3 炸药类型

Table 3 Explosive type

地质条件	炸药类型
一般Ⅲ、Ⅳ级围岩	乳化炸药
高地应力、岩爆风险段	低爆速、低密度炸药
周边眼光面爆破	小直径爆炸药卷

隧道,下元古界片麻岩、闪长岩、花岗岩深埋段落干燥岩体较完整,隧道开挖过程中可能出现岩爆。

2 采用蒙特卡罗方法确定爆破方法

2.1 钻孔数据分析

采用凿岩机实施隧道开挖时,需实时评估掌子面岩体特性。钻孔过程中,钻杆与钻头在轴向推力作用下接触岩体,活塞施加冲击荷载实现岩体破碎。该过程同步记录冲击能量 E_p 和冲击次数 C_p 以评估单位体积钻孔所需能量,通过式(1)计算单位体积钻孔能量:

$$E_d = \frac{E_p C_p K}{V_d S}$$

(1)

式中: E_d 为单位体积钻孔能量; E_p 为冲击能量; C_p 为冲击次数; K 为冲击能量损失; V_d 为钻井速度; S 为钻井面积。

冲击能量 E_p 采用式(2)计算:

$$E_p = ALP_p g$$

(2)

式中: A 为活塞面积; L 为活塞行程; P_p 为冲击压力; g 为重力。

当冲击能量与钻孔速度之比恒定时,冲击次数随岩石硬度增大而显著增加。钻孔能量 E_d 表示凿

岩机破碎单位体积岩体所做的功。钻孔速度随进给压力呈非线性增长趋势,该特性直接影响钻孔能量评估精度。因此,引入压力修正参数 K 。

昂思多隧道掌子面开挖过程中实测的钻孔比能分布如图 1 所示。图 1a 揭示钻孔比能随孔深变化范围为 $80\sim 280\text{J}/\text{cm}^3$,图 1b 显示钻孔比能集中于 $100\sim 150\text{J}/\text{cm}^3$ 。数据空间变异性表明掌子面岩体刚度存在显著非均质特征。

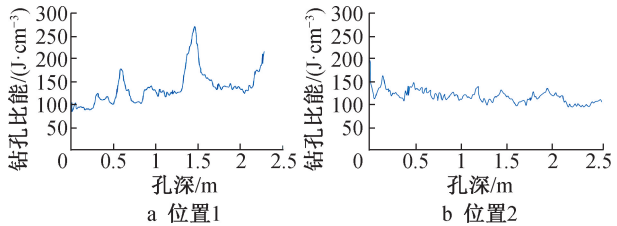


图 1 钻孔比能分布

Fig. 1 Distribution of drilling specific energy

岩体特性作为爆破开挖的关键控制因子,其与钻孔比能的关联机制研究具有重要工程意义。钻孔能量与岩石无侧限抗压强度间服从幂律关系:

$$\sigma_c = a(E_d)^b \tag{3}$$

式中: σ_c 为无侧限抗压强度; a, b 为相关因子。

文献[14]给出了钻孔能量 E_d 与主波速度 V_p 之间的关系,并且 V_p 可用式(4)计算。

$$V_p = cE_d + d \tag{4}$$

式中: c, d 为相关因子。

2.2 爆破设计

爆破布孔设计指在岩面上按特定几何模式钻设炮孔群组,以装填炸药并实施时序控制起爆。爆破流程如图 2 所示。其核心参数包括:孔距 S (同排相邻炮孔间距),最小抵抗线 B (炸药中心至最近自由面的垂直距离),钻孔长度 L (等效于开挖进尺),单孔装药量 Q ,起爆时序。

有限炸药能量的高效利用依赖炮孔定位精度:当孔距过大时,岩体破碎不充分;当孔距过小时,则导致能量冗余与超挖风险。隧道爆破关键变量常通过半经验方程确定,因此,在初始设计阶段,需优化炮孔排数、毫秒延期起爆顺序和爆破作用指数(表征爆炸能量对岩体的覆盖效率),其中,炮孔排数由昂思多隧道断面尺寸决定,如图 3 所示。最佳爆破量取决于开挖的爆炸能量覆盖范围。昂思多隧道岩石开挖爆破模式的孔距和爆破量如图 3 所示。炮孔排数根据昂思多隧道尺寸自动确定。

2.3 蒙特卡罗模拟

蒙特卡罗模拟作为一种基于随机抽样的数值计算方法,可有效解决多参数耦合的复杂工程优化

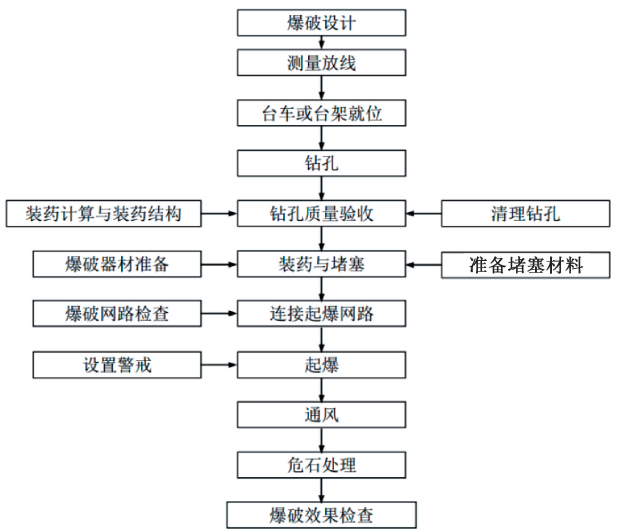


图 2 爆破流程

Fig. 2 Blasting process

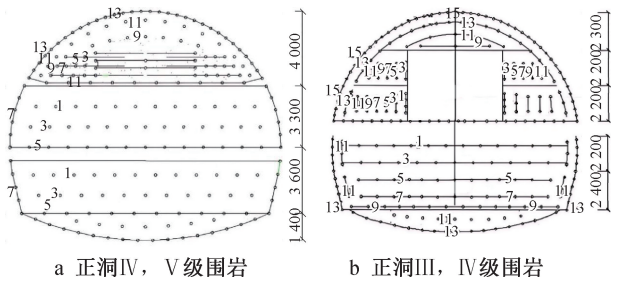


图 3 昂思多隧道岩石开挖爆破模式的孔距布置

Fig. 3 Hole spacing layout for rock excavation and blasting mode in Angsido Tunnel

问题。本研究将其应用于隧道爆破参数优化,重点针对单孔装药量 C 的确定性设计。基于式(5)建立装药量计算模型:

$$C = qBLS \tag{5}$$

式中: q 为装药系数。

装药系数的确定是岩体爆破设计的核心环节。用于评估岩石爆破开挖中装药系数的公式示例如表 4 所示^[15]。这些公式需识别岩石性质,包括强度和波速,以确定所需装药系数。如 2.1 节所述,待开挖岩石的强度随岩石表面位置而变化。所需的药粉系数高会导致孔距减小,而所需的药粉系数低则可增加孔距。

基于图 4 所示初始稀疏布孔方案启动模拟流程。爆破孔在目标设计域内随机分布,定位完成后逐孔计算以下参数,即孔距 S 、最小抵抗线 B 、装药系数 q 、单孔装药量 C 。参数计算后校验孔距与装药量是否满足预设约束条件。若条件未满足,则随机重置孔位并重启迭代寻优;若经多轮迭代仍无可行方案,则将孔数增加 1 个后重新初始化随机布孔过

表 4 装药系数计算公式

计算方法	计算参数	公式
Hauser 法	最小抵抗线与开挖类型	$q=eglf(w)$
	岩石分级或岩石单轴抗压强度	其中, $e, g, l, f(w)$ 为相关系数
	填塞长度	
	炸药装药密度	
	岩石试样剪切波速	$q=KH^\alpha$
RTRI 法	岩石试样抗剪强度	$q=(0.06\sim0.07)H^{0.06}$
	爆破初速	其中, K 为相关系数, H 为岩石抗压强度

程。通过循环迭代与条件验证,最终获得满足约束条件的最小孔数解,此时对应的孔网构型即为优化爆破模式。

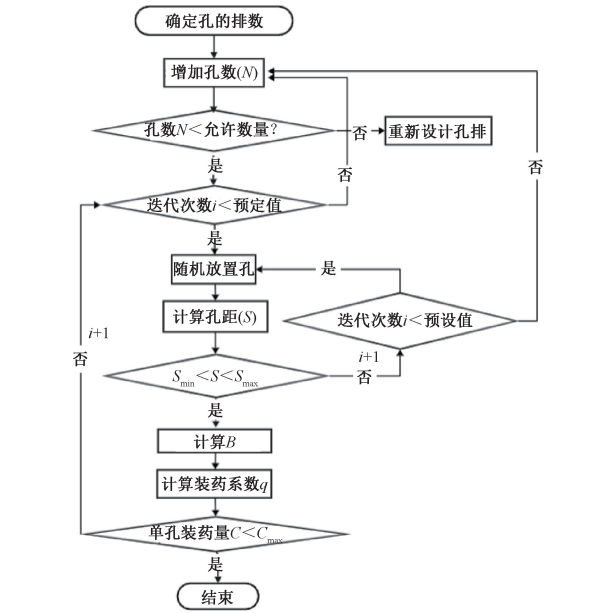


图 4 确定爆破方式流程

Fig. 4 Process for determining blasting method

3 结果与分析

计算设定最大模拟迭代次数上限为 1 000 次,增加迭代次数可提升满足约束条件的布孔方案寻优概率,但将显著延长计算耗时。因此,需通过试算确定最优迭代次数。由表 5 可知,迭代次数达到 600 次以上,结果趋于稳定,因此采用 600 次进行仿真迭代。

图 5a 所示为软岩区 ($E_d=40\sim160\text{J}/\text{cm}^3$),采用 30 孔低密度布孔模式;图 5b 所示为硬岩区 ($E_d=50\sim250\text{J}/\text{cm}^3$),采用 33 孔高密度布孔模式。炮孔位姿依据钻孔能量梯度场动态优化,实现岩体特性-爆破参数的精准映射。上述结果表明,基于空间分布的炮孔定位与装药量优化方法具有显著工程适用性。蒙特卡罗模拟的迭代次数需平衡优化精度与计算效率。

表 5 模拟迭代次数确定的敏感性分析

Table 5 Sensitivity analysis determined by simulating iteration times			
迭代次数/次	平均值/孔	最小值/孔	最大值/孔
200	26	24	29
400	29	26	33
600	33	29	34
800	33	29	34
1 000	33	30	34

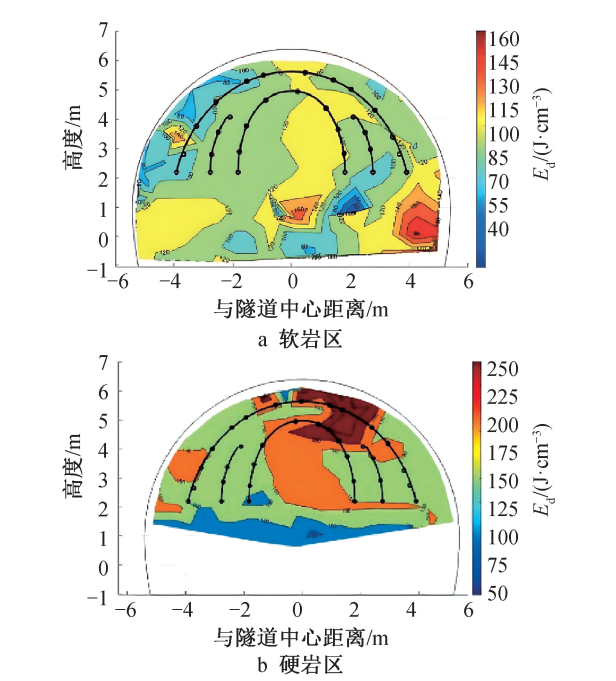


图 5 蒙特卡罗模拟确定的爆破布孔方案
Fig. 5 The blasting hole layout scheme determined by Monte Carlo simulation

4 结语

隧道施工自动化技术已成为提升隧道工程质效的核心驱动力。本文提出基于蒙特卡罗模拟的爆破参数优化方法,显著提升凿岩台车综合效能。研究表明,在原有施工方案的基础上,蒙特卡罗模拟方法通过爆破参数动态调控机制可实现炮孔定位、孔网密度与装药量的多目标协同优化;钻孔数据驱动的轮廓成型控制技术显著提升爆破生产率;当前方法存在计算时效性瓶颈,制约现场实时决策效率。未来将在智能凿岩台车全自动施工平台开展爆破试验,验证优化方案的工程适用性。

参考文献:

[1] 张镜剑,傅冰骏.隧道掘进机在我国应用的进展[J].岩石力学与工程学报,2007,26(2):226-238.
ZHANG J J, FU B J. Advances in tunnel boring machine application in China[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2007, 26(2): 226-238.
[2] 杨年华,张志毅,邓志勇,等.硬岩隧道快速掘进的钻爆技术[J].工程爆破,2003,9(1):16-21.

YANG N H,ZHANG Z Y,DENG Z Y,et al. Drilling-and-blasting technology for rapid excavation of hard-rock tunnels [J]. Engineering blasting,2003,9(1): 16-21.

[3] 邹宝平,杨建辉,王建秀,等. 基于灰色理论与 BP 神经网络的特长瓦斯隧道爆破参数优选 [J]. 铁道标准设计, 2015, 59(8): 131-136.

ZOU B P,YANG J H,WANG J X,et al. Optimal prediction of blasting parameters for extra-long gas tunnel based on grey theory and BP neural network [J]. Railway standard design, 2015, 59(8): 131-136.

[4] YILMAZ O,UNLU T. An application of the modified Holmberg-Persson approach for tunnel blasting design [J]. Tunnelling and underground space technology,2014,43:113-122.

[5] 魏继红,孙少锐,彭建忠,等. 高速公路连拱隧道超挖预测及评价研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S1): 3324-3329.

WEI J H,SUN S R,PENG J Z,et al. Study on overexcavation prediction and evaluation of expressway multi-arch tunnel [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2006, 25(S1): 3324-3329.

[6] MOHAMMADNEJAD M,GHOLAMI R,SERESHKI F,et al. A new methodology to predict backbreak in blasting operation [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2013,60:75-81.

[7] SAGHATFOROUSH A,MONJEZI M,SHIRANI FARADONBEH R,et al. Combination of neural network and ant colony optimization algorithms for prediction and optimization of flyrock and back-break induced by blasting [J]. Engineering with computers, 2016,32(2): 255-266.

[8] 柯庆辉. 隧道爆破施工对周围建(构)筑物损伤分析及危害控制研究 [D]. 长沙:中南大学,2012.

KE Q H. Study on control and analysis for damage of surrounding structures under blasting of tunnel [D]. Changsha: Central South University,2012.

[9] HU Y G,LU W B,CHEN M,et al. Comparison of blast-induced damage between presplit and smooth blasting of high rock slope [J]. Rock mechanics and rock engineering, 2014, 47(4): 1307-1320.

[10] YAN P,LU W B,CHEN M,et al. Contributions of in situ stress transient redistribution to blasting excavation damage zone of deep tunnels [J]. Rock mechanics and rock engineering,2015,48(2): 715-726.

[11] 张在晨,林从谋,黄志波,等. 隧道爆破近区振动的预测方法 [J]. 爆炸与冲击,2014,34(3): 367-372.

ZHANG Z C,LIN C M,HUANG Z B,et al. Prediction of blasting vibration of area near tunnel blasting source [J]. Explosion and shock waves,2014,34(3): 367-372.

[12] ÁLVAREZ-VIGIL A E, GONZÁLEZ-NICIEZA C, LÓPEZ GAYARRE F, et al. Predicting blasting propagation velocity and vibration frequency using artificial neural networks [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2012,55:108-116.

[13] LI J C,LI H B,MA G W,et al. Assessment of underground tunnel stability to adjacent tunnel explosion [J]. Tunnelling and underground space technology,2013,35:227-234.

[14] LIU L,LI S J,ZHENG M Z,et al. Inverting the rock mass P-wave velocity field ahead of deep buried tunnel face while borehole drilling [J]. International journal of mining science and technology,2024,34(5): 681-697.

[15] 罗勇,崔晓荣. 工程爆破中装药不耦合系数的研究 [J]. 有色金属(矿山部分),2008,60(4): 39-43.

LUO Y,CUI X R. Study on the decoupling charging coefficient in engineering blasting [J]. Nonferrous metals (mining section), 2008,60(4): 39-43.